Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

MODELADO DE RELÉS DIGITALES UTILIZANDO MATLAB

Celia Sena
UTE
Montevideo, Uruguay

Es inevitable y no deseado que perturbaciones naturales o errores humanos conduzcan a una interrupción en el normal funcionamiento del sistema de potencia. El ingeniero que trabaja con protecciones debe desarrollar y mantener sistemas de protección para las perturbaciones más probables basados en el juicio común, en la práctica y los estudios, para minimizar las interrupciones del servicio eléctrico y daño al equipamiento. Entender el funcionamiento y limitaciones de los diferentes relés es vital para sus aplicaciones. Este trabajo presenta el modelado de un relé de protección y la simulación del mismo, mediante la tecnología de simulación existente en MATLAB. La técnica de simulación permite entender y evaluar el funcionamiento de los relés de protección de los sistemas de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos del ingeniero que trabaja con protecciones es asegurar la continuidad del servicio eléctrico brindado a los clientes, aún en condiciones adversas de funcionamiento del sistema. Sin embargo, pueden ocurrir perturbaciones naturales o errores humanos que hacen que el servicio se vea interrumpido. Estas perturbaciones deben ser aisladas dentro de un área limitada y en el mínimo tiempo necesario para evitar daños al equipamiento, largas interrupciones del servicio en áreas muy extendidas y posibles daños personales. Los relés de protección representan un papel muy importante en todo este proceso.

Originalmente, todos los relés de protección eran electromecánicos; posteriormente, se introdujeron los relés de estado sólido y más tarde los relés digitales, basados en microprocesadores. Actualmente, los relés digitales se presentan con una línea de productos establecidos por la mayoría de los fabricantes. Así como se ha desarrollado el campo del relé digital, se ha reconocido una necesidad de evaluación de los algoritmos utilizados por los mismos para conocer el mecanismo de funcionamiento y la característica de operación [1].

En este trabajo se presenta la emulación del algoritmo utilizado por un relé de protección (modelado) y la prueba del mismo (simulación), utilizando la tecnología de simulación existentes en MATLAB [2]. Un procedimiento típico de evaluación es simular faltas en el sistema de potencia usando programas de estudio de transitorios electromagnéticos y obtener las formas de onda de tensiones y corrientes en los secundarios de los transformadores de medida; también se pueden obtener de registradores de perturbaciones. Estas señales son las entradas al modelo del relé de protección. La operación y los algoritmos del relé son modelados y se obtiene como salida una señal de disparo.

Otro concepto importante en el momento de evaluar relés de protección usando la simulación es la interacción de ciclo abierto (open-loop) y la interacción en tiempo real. La interacción de ciclo abierto se define como la interacción donde el modelo del relé de protección está recibiendo señales de tensiones y corrientes, tomando decisiones y enviando una señal de disparo. Sin embargo, esta señal de disparo no es usada en forma inmediata para reconfigurar el modelo del sistema de potencia, que resultaría en unas formas de ondas nuevas generadas por el nuevo modelo. La interacción en tiempo real se define como la que causa un cambio inmediato en el modelo del sistema de potencia, que se refleja en la operación del interruptor como consecuencia del disparo del relé. Como resultado se generan nuevas señales de tensiones y corrientes con el nuevo modelo representado por el sistema de potencia reconfigurado.

II. MATLAB

Se eligió el lenguaje MATLAB para desarrollar los modelos del relé de protección. MATLAB, es un lenguaje que posee un alto desarrollo en técnicas computacionales, el cual integra cálculos, visualización y programación en un ambiente fácil de usar, donde los problemas y soluciones son expresadas en una notación matemática familiar.

Algunos de los siguientes factores ayudaron a la elección de este lenguaje:

- Estructura de software flexible que comprende bibliotecas de modelos y programas que habilitan

integrar diferentes componentes en un mismo paquete.

- SIMULINK, un programa que acompaña a MATLAB, es un sistema interactivo que permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Es un programa gráfico que permite modelar el sistema por medio de diagrama de bloques y manipularlo en forma dinámica. SIMULINK puede trabajar con sistemas lineales o no lineales, sistemas de tiempo continuo o tiempo discreto, etc.[3]
- MATLAB comprende una familia de funciones predefinidas para resolver aplicaciones específicas, denominadas Toolboxes. Algunas de las Toolboxes desarrolladas incluyen las áreas de Signal Processing, Fuzzy Control, etc.

III. MODELO

A continuación se describe el modelado de un relé de distancia, que utiliza como entradas formas de onda de tensiones y corrientes muestreadas y emplea algoritmos apropiados y microprocesadores para implementar las funciones de protección [4].

1. Diagrama de bloques:

Como se mencionó oportunamente, el relé se modela por medio de un diagrama de bloques, Fig.1.

Una característica importante, en el diseño del modelo, es que cada bloque funcional puede ser simulado por separado o como parte de un modelo más complejo. Esto le permite al usuario abastecerse de una biblioteca de módulos funcionales que puede combinar de acuerdo a los requerimientos exigido por la aplicación particular.

2. Señales de entrada:

El relé a modelar utiliza tensiones y corrientes muestreadas a 16 muestras por ciclo, y la frecuencia nominal a la que opera es ajustable, 50 o 60 Hz. Previo al muestreo de las señales de entrada, estas son filtradas. El filtro utilizado es un filtro pasabajo con una respuesta infinita al impulso (IIR).

3. Transformada de Fourier:

Para crear los fasores a partir de los valores muestreadas de tensiones y corrientes, utiliza la transformada de Fourier recursiva (DFT), de período completo. Antes de obtener los fasores de corriente, esta es procesada para eliminar la componente de continua que puede estar presente.

Si una corriente pasa a través de una impedancia que es réplica de la impedancia del sistema de potencia, la tensión en bornes de la impedancia réplica no contiene componente de continua la cual puede estar presente en la corriente.

Si la corriente de falta tiene la siguiente ecuación:

$$i(t) = I\,\mathrm{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - I\,\mathrm{sen}(\alpha - \theta)e^{-\frac{t}{T}} \qquad (1)$$

donde:

I: valor de pico

$\omega = 2\pi f$

α: ángulo de la tensión en la cual la falta ocurre

$\theta = \arctan(\omega L/R)$: ángulo de la impedancia del sistema de potencia

$T = L/R$

$Z_t = R_t + j\omega L_t$: es réplica de la impedancia del sistema, $Z = R + j\omega L$, sí: $L/R = L_t/R_t$ ó $\theta = \arctan(\omega L/R) = \theta_t = \arctan(\omega L_t/R_t)$

La tensión en bornes de la impedancia réplica es:

$$v(t) = R_t i(t) + L_t \frac{di(t)}{dt} \qquad (2)$$

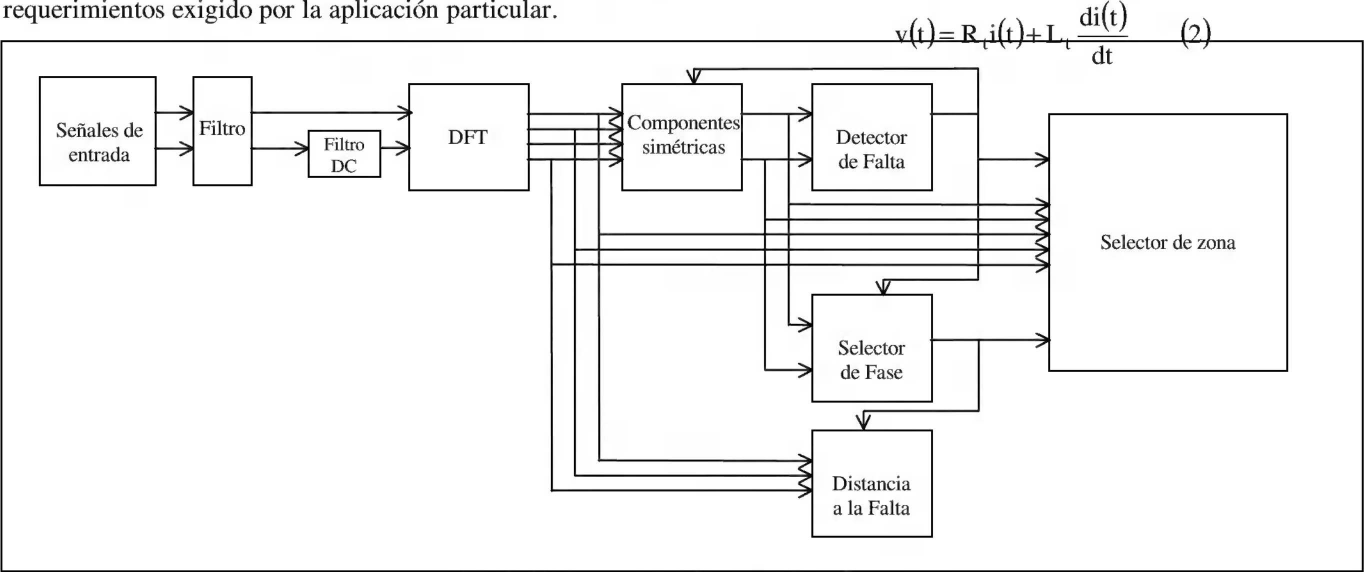


Fig.1: Diagrama de bloques del relé

sustituyendo i(t) se llega a la siguiente ecuación:

$$v(t)=\sqrt{R_t^2+(\omega L_t)^2}\, I \operatorname{sen}(\omega t+\alpha) \qquad (3)$$

En conclusión; la tensión en bornes de la impedancia réplica no contiene componente de continua.

4. Detector de falta:

El detector de falta es una función de sobrecorriente no direccional. Para determinar la operación del detector de falta se utiliza la variación de la magnitud de las corrientes de secuencia (directa, inversa y homopolar) y la magnitud total de las corrientes de secuencia inversa y homopolar. Esta señal es requerida para habilitar muchas de las funciones de protección incluidas en el relé.

5. Selector de fase:

El relé que se modelo puede realizar disparos monofásicos o trifásicos. Cuando son requeridos disparos monofásicos, el algoritmo del selector de fase selecciona cual de las fases se debe disparar, además de determinar el tipo de falta. Esta función también se utiliza en el momento de calcular la distancia a la falta, para poder elegir las fases de tensión y corrientes apropiadas.

Para determinar el tipo de falta se utiliza la componente de secuencia directa de la corriente de falta I_{1F}, la componente de secuencia inversa I_2 y la componente homopolar I_0. La componente de secuencia directa I_{1F} se calcula eliminando de la corriente de falta, la corriente de pre-falta. En el cálculo se verifican los niveles de corriente I_2 e I_0 y de la medida del ángulo entre I_2 e I_{1F} se determina el tipo de falta.

6. Selección de zona:

Las características de las zonas de actuación del relé modelado pueden ser Mho o Reactancia. La característica Reactancia es supervisada por una característica Mho. Una característica Mho clásica tiene 2 entradas: una señal de operación (IZ-V) y una señal de polarización (V_{POL}). La característica se determina midiendo el ángulo entre las señales de entrada. La lógica usada para medir el ángulo se llama comparador de ángulo. En los relés digitales las señales de operación y polarización son obtenidas utilizando un filtro de Fourier; y se obtienen los valores de magnitud y ángulo de las señales. El comparador verifica si el ángulo entre las señales está dentro de la característica elegida.

Para cada zona del relé de protección hay seis funciones de distancia separadas. Hay tres funciones de distancia para defectos entre fases (AB - BC - CA); y tres para defectos fase a tierra (AG - BG - CG) [5], [6].

7. Distancia a la falta:

Antes de determinar la distancia a la falta, se requiere conocer el tipo de falta para poder determinar las fases de tensión y corrientes a utilizar. Si no se puede determinar el tipo de defecto, la distancia a la falta no se calcula.

El algoritmo implementado utiliza información de tensiones y corrientes de solo un extremo de la línea de transmisión.

Suponemos una falta trifásica a una distancia n (%) de la longitud de la línea desde el extremo R, Fig.2. Asumimos que la protección se encuentra localizada en el extremo R, la tensión en el relé es:

$$V_R = n \cdot Z_L \cdot I_R + R_F (I_{FR} + I_{FS}) \qquad (4)$$

Z_L = impedancia de la línea
I_R = corriente en el extremo R
R_F = resistencia de falta
I_{FR} = corriente de falta en el extremo R
I_{FS} = corriente de falta en el extremo S

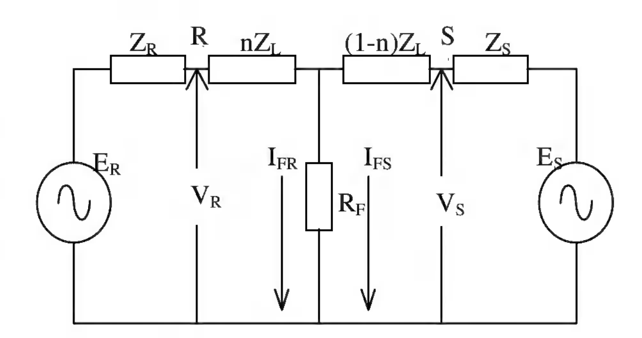


Fig.2: Línea de transmisión alimentada por los dos extremos

Para poder determinar los valores de corriente de falta(I_{FR}, I_{FS}) se le resta a la corriente total, durante la falta, la corriente de pre-falta.

Haciendo cálculo se llega a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\operatorname{Re}(V_R)\operatorname{Im}(I_{FR}) - \operatorname{Im}(V_R)\operatorname{Re}(I_{FR})}{\operatorname{Re}(Z_L \cdot I_R)\operatorname{Im}(I_{FR}) - \operatorname{Im}(Z_L \cdot I_R)\operatorname{Re}(I_{FR})} \qquad (5)$$

Donde se elimina la resistencia de falta, bajo la hipótesis que IFR e IFS están en fase. Esta hipótesis significa que el sistema de la Fig.2 es homogéneo; es decir, que la fuente y línea deben tener el mismo ángulo. Aunque este en la realidad no se cumple, sistemas no homogéneos producen un error pequeño en la estimación de la localización de la falta.

8. Señales de salida:

Como señales de salida se obtiene una señal de disparo, el tipo de falta y la zona donde fue el defecto; además, se obtiene la distancia a la falla desde el extremo del relé.

IV SIMULACIÓN

Luego de modelados los bloques funcionales, se esta en condiciones de diseñar el relé de protección. Diseñado el mismo, e implementados los ajustes, se está habilitado para simular su funcionamiento.

En la Fig.3 se presenta el relé modelado en SIMULINK, que se utilizó para la simulación. Las señales de tensiones y corrientes que alimentan el relé, en todos los casos estudiados, fueron generadas por relés digitales que tienen la función de registro incorporada, formato COMTRADE; por lo cual la interacción con el sistema de potencia es de ciclo abierto [7].

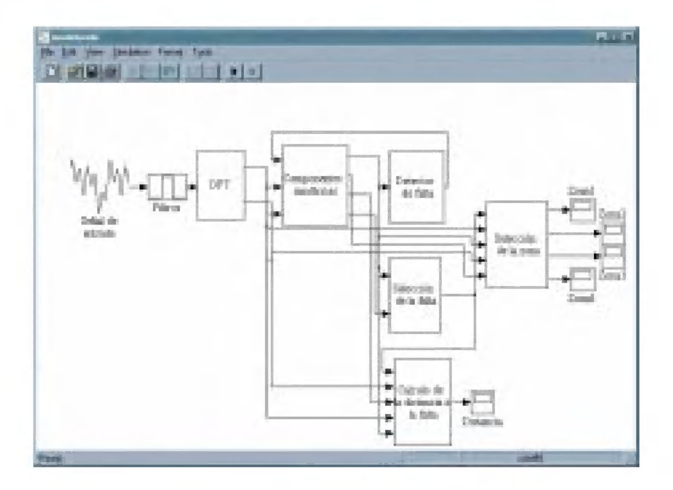


Fig.3: Modelo de relé simulado

V EVALUACIÓN

Durante la simulación, se calcularon los valores de tensiones y corrientes, así como el estado de todas las señales lógicas y funcionales usadas por el relé. Los resultados de los cálculos fueron guardados en variables, para su posterior estudio, y algunas de las señales fueron mostradas en forma gráfica en la pantalla, como muestra la Fig.3. Estas señales se eligieron para evaluar el modelo del relé por completo.

Los gráficos de tensiones y corrientes de fase y de tensiones y corrientes de secuencia, calculados dentro del relé, permiten detectar los cambios en la forma de onda de las señales y relacionarlos con los cambios en la operación del relé.

En la observación del funcionamiento de cada bloque por separado, desde las señales de entrada hasta las señales de salida, se evaluaron los algoritmos que definen cada uno.

VI CONCLUSIONES

Con las nuevas tecnologías introducidas en los relés de protecciones, es necesario desarrollar nuevas herramientas de análisis, para evaluar los mismos. Este trabajo apunta en esa dirección.

El modelo presentado en este trabajo aún está en desarrollo, así como la generación de señales de corriente y tensiones desde otras fuentes, como por ejemplo programas de estudio de transitorios electromagnéticos, para poder obtener una interacción en tiempo real.

Proteger un sistema de potencia es la ciencia de aplicar y ajustar relés de protección, para obtener la máxima selectividad y sensibilidad frente a faltas. Tanto, que el relé opere cuando no debe o no opere cuando debe resulta en un problema en el sistema de potencia. Entender la teoría de funcionamiento, aplicaciones y limitaciones de las diferentes funciones de un relé de protección es una tarea indispensable para los técnicos de protecciones.

Así como las nuevas tecnologías aplicadas en los relés se vuelve más comprensible por los usuarios, se espera que el uso de la simulación se vuelva una herramienta indispensable para evaluar nuevas técnicas en los relés, para estudiar nuevas aplicaciones y descifrar la mala operación de los mismos.

VII REFERENCIAS

[1] Phadke, Thorp: "Computer Relaying for Power Systems".
[2] MATLAB: Using Matlab, MathWorks, Inc..
[3] SIMULINK: Using Simulink, Math Works, Inc..
[4] DLP - "Digital Line Protection".
[5] Warrington: "Protective Relays Their Theory and Practice"
[6] DLP - "Instruction Manual"
[7] IEEE Standard: "Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems"

VIII Agradecimientos

Parte del trabajo presentado fue desarrollado por Fernando García Castro (Subgerencia de Ingeniería y Desarrollo de Protecciones, Gerencia de Sector Protecciones, UTE).

Biografía

Celia Sena nació en Salto, República Oriental del Uruguay. Recibió el título de Ingeniera Electricista en la Facultad de Ingeniería de la República Oriental del Uruguay, en el año 1997.

Ingresó en la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (U.T.E.) en 1992 y actualmente trabaja en la Gerencia de Sector Protecciones, Subgerencia de Ingeniería y Desarrollo de Protecciones.